

# Valutazione critica dell'impiego di energia elettrica e chimica in EAF per la diminuzione dell'impatto ambientale

C. Mapelli, S. Baragiola, S. Panza

*Il presente lavoro presenta un esempio di valutazione integrata dell'impatto ambientale, in cui viene studiato il rendimento energetico ed exergetico di un forno elettrico ad arco della capacità di 40 ton. I risultati dei processi di simulazione svolti e validati in base ai dati sperimentali provenienti dal forno consentono di procedere ad una valutazione critica circa il bilanciamento delle energie chimiche e dell'energia elettrica al fine di limitare l'impatto ambientale complessivo del processo fusorio.*

**Parole chiave:** ecologia, acciaieria, forno elettrico, fusione, energia e exergia

## QUADRO DI RIFERIMENTO DEL PRESENTE STUDIO

Il presente studio si inserisce nel quadro di riferimento imposto dalla direttiva IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control), che tratta la diminuzione dell'inquinamento dei vari punti di emissione all'interno dell'Unione Europea. Nella direttiva è contenuto l'elenco delle tipologie di impianto che devono ricevere l'autorizzazione da parte delle autorità competenti in funzione della conformità a quanto previsto nelle BAT (Best Available Technologies). Nella direttiva sono contenuti i regolamenti di base per le autorizzazioni integrate. "Integrate" significa che le autorizzazioni devono prendere in considerazione l'intera prestazione dell'impianto per quanto concerne la sua interazione con l'ambiente: emissioni nell'aria, nell'acqua e nel suolo, produzione di rifiuti, uso delle materie prime, efficienza energetica, rumore, prevenzione degli incidenti, gestione dei rischi ecc.. Il forno elettrico ad arco rappresenta un caso emblematico della complessità di una sistematica valutazione, che sia in grado di stimare le prestazioni del processo fusorio in una visione integrata [1,2,3,4]

La valutazione critica dell'efficienza energetica di tale impianto fusorio può ben rappresentare la complessità di valutazione dell'impatto ambientale, in quanto risultano coinvolti molteplici aspetti, tra i quali i più importanti sono il consumo dell'energia elettrica, lo sviluppo di calore da parte delle reazioni chimiche, nonché l'ossidazione di elementi metallici che vengono persi sotto forma di scoria o di polveri trascinata dai fumi.

Se si desidera impostare uno studio su basi tecnico-scientifiche è necessario, anzitutto, stabilire un criterio che sia in grado di quantificare e rendere tra loro confrontabili i principali parametri che caratterizzano il processo. Nei forni di riscaldamento le maggiori perdite di exergia sono causate dalle irreversibilità della combustione e del trasferimento di calore nel forno e nel recuperatore; anche l'ossidazione dell'acciaio influisce considerevolmente sull'efficienza exergetica del forno. Le perdite esterne di exergia sono grandi e sono associate al rilascio nell'atmosfera dei gas di combustione ancora caldi [5,6,7,8].

## OBIETTIVO E CARATTERISTICHE FONDAMENTALI DEL MODELLO DI SIMULAZIONE

L'obiettivo è quello di sviluppare ed iniziare a consolidare un approccio che, su basi scientifiche, consenta di determinare l'aspetto di efficienza energetica attraverso l'utilizzo di grandezze termodinamiche, che siano in grado di quantificare sinteticamente l'impatto ambientale che risulta essere connesso:

- al consumo di energia elettrica e alla sua conversione in calore;
- al calore generato dai processi di fusione;
- alla perdita di elementi metallici sotto forma di ossidi;
- al riscaldamento dell'aria e dei fumi generati;
- al riscaldamento e al consumo di materie e materiali ausiliari: acqua, grafite degli elettrodi, materiale refrattario di rivestimento.

Tale approccio risulta essere impostato su concetti scientifici di validità generale:

- la trasmissione del calore è stata descritta dalla legge di Fourier risolta in coordinate cilindriche;
- le reazioni chimiche sono state trattate secondo i principi di base della termodinamica (potenziali chimici di ossidazione) e della cinetica delle reazioni chimiche per quanto concerne i fenomeni di trasporto di massa;
- l'impatto ambientale è stato valutato sulla base di bilanci energetici ed exergetici.

All'interno del modello non si tiene conto semplicemente di un bilancio globale tra istante finale ed istante iniziale della simulazione, ma si rileva l'evoluzione termica, energetica ed exergetica durante l'esercizio del forno. Nello svolgere la simulazione il modello di calcolo tiene conto dell'evoluzione geometrica del forno (discesa e fusione del rottame), del numero di aperture della volta, nonché della portata di ossigeno insufflata.

Uno dei punti salienti dell'applicazione del modello e della sua calibrazione risulta essere la definizione di plausibili coefficienti di trasmissione del calore nelle diverse parti del sistema fusorio. Le misure sperimentali svolte presso la ASO Siderurgica hanno consentito di definire dei coefficienti equivalenti di trasmissione del calore, senza imporre ipotesi piuttosto complesse, quali quelle di mezzo poroso, per descrivere la trasmissione del calore nelle regioni occupate dal rottame prima della sua fusione, quando la frazione solida è circondata dalla fase gassosa che ne altera la conducibilità termica. La stessa azione di taratura è stata svolta, anche a partire da dati contenuti in letteratura e utilizzati come riferimento, sui coefficienti di trasmissione termica ca-

Carlo Mapelli, Stefano Baragiola

Dipartimento di Meccanica Politecnico di Milano

Silvano Panza

Direttore Generale ASO Siderurgica Ospitaletto (BS)

Memoria presentata alla giornata di studio "Emissioni di Polveri e Fumi",  
Brescia 27 giugno 2004

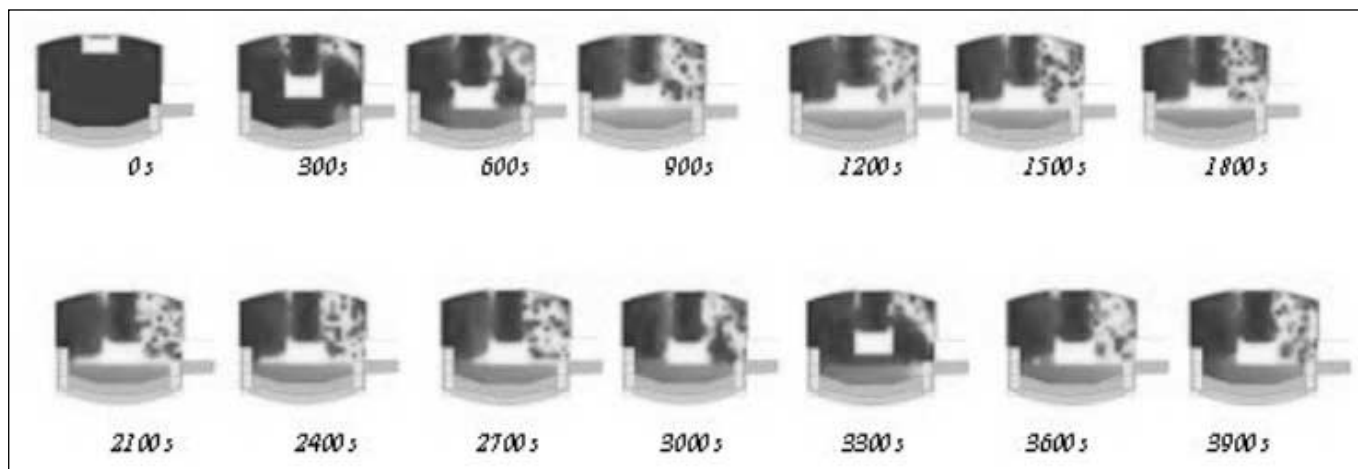


Fig. 1 – Esempi di evoluzione termica all'interno del forno durante il processo fusorio.

Fig. 1 – Example of the thermal evolution during a melting process of the scrap in a 40 tons EAF as a function of the time.

Parametri Impostati in Ingresso	
A	B
<b>Parametri Reali:</b>	
<b>Fisici:</b>	
Temperatura Iniziale	25 °C
Temperatura Ambiente	25 °C
Massa Totale Caricata	40000 kg
Massa Caricata Prima Cesta	25000 kg
<b>Chimici:</b>	
Fe	97,885 %
Si	1,2 %
C	0,5 %
Al	0,02 %
Mn	0,34 %
Mg	0,015 %
Cr	0,04 %
Scarificante	1200 kg

Tabella 1 – Parametri di ingresso impostati per le simulazioni.

Table 1 – Input parameters adopted for the performed simulations.

ratterizzanti i refrattari, i sistemi di raffreddamento ad acqua del forno, la fase gassosa sottostante l'arco elettrico, la conducibilità dell'aria che forzata in un moto ascensionale dai sistemi di aspirazione al di sopra del bagno di acciaio fuso. E' evidente che il modello stesso, se applicato a processi fusori che si caratterizzano per differenti tipologie nella pezzatura dei rottami, dei sistemi di raffreddamento ad acqua, dei refrattari, della velocità imposta dai sistemi di aspirazione ecc., necessiterà di una nuova taratura dei coefficienti di trasmissione del calore (Fig. 1).

Il modello è stato validato mediante il confronto tra i risultati forniti e la misurazione dei seguenti dati:

- tempo totale necessario alla fusione di tutta la carica;
- temperatura media del bagno a fine affinazione;
- temperatura media dei fumi;
- percentuale di elementi chimici nel bagno;
- rendimento del rottame.

Dal confronto si è potuto evincere che:

- I. il tempo necessario alla completa fusione delle ceste caricate è molto simile a quello riscontrato sperimentalmente (2721 s contro 2700 s), e parallelamente la temperatura allo spillaggio si discosta solo leggermente (1616 °C contro 1600 °C);
- II. la temperatura media dei fumi all'interno del forno si discosta mediamente di 6,7°C da quella rilevata sperimentalmente al quarto foro;
- III. il consumo percentuale, riferito alla massa caricata, degli elementi chimici presenti nel rottame fornisce risul-

tati confrontabili e poco discosti dai valori misurati, soprattutto per gli elementi presenti in maggior quantità (solo per il manganese si è rilevato uno scostamento significativo pari al 42%);

- IV. il rendimento del rottame, calcolato come rapporto percentuale tra la massa spillata e quella caricata, è anch'esso abbastanza simile.

Da queste considerazioni si evince che:

- I. la distribuzione di temperatura all'interno del bagno di acciaio segue un'evoluzione realistica;
- II. la distribuzione di temperature nei fumi può ritenersi attendibile, anche se per una loro più completa ed accurata descrizione sarebbe necessario includere i moti convettivi, per i quali si rimanda all'utilizzo di modelli fluidodinamici più sofisticati;
- III. la sezione dedicata alla descrizione della lancia ad ossigeno fornisce risultati attendibili: gli scostamenti tra dati misurati e valori calcolati relativi al consumo percentuale di manganese possono essere diminuiti con una migliore taratura dei coefficienti di trasporto.

#### SIMULAZIONE E RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Il modello è stato validato con i risultati sperimentali dell'acciaieria ASO Siderurgica di Ospitaletto dotata di un forno della capacità di 40 ton di acciaio, in quanto il sistema fusorio presenta il vantaggio di una configurazione impiantistica piuttosto semplice, in cui non si presentano sistemi di apporto di calore per combustione degli idrocarburi che necessiterebbero di una modellistica apposita, che comunque potrà in futuro essere aggiunta al modello di simulazione adottato.

I parametri di ingresso (tranne valore dell'energia elettrica specifica erogata ed il consumo specifico di ossigeno) delle simulazioni sono stati mantenuti fissi (Tabella 1).

I risultati riguardanti i flussi energetici ed exergetici vengono considerati attraverso il confronto tra i flussi in ingresso e quelli in uscita dal sistema fusorio (Figura 2, Figura 3).

Oltre al 100% di entalpia legata all'energia elettrica immessa nel forno, vi sono da considerare dei contributi aggiuntivi dovuti al consumo degli elettrodi e alle reazioni di ossidazione degli elementi contenuti nel bagno metallico.

La partizione dei flussi energetici in ingresso ed in uscita è stata calcolata (Tabella 2, Tabella 3, Tabella 4).

La partizione dei flussi exergetici in ingresso ed in uscita dal forno è stata calcolata (Tabella 5, Tabella 6, Tabella 7).

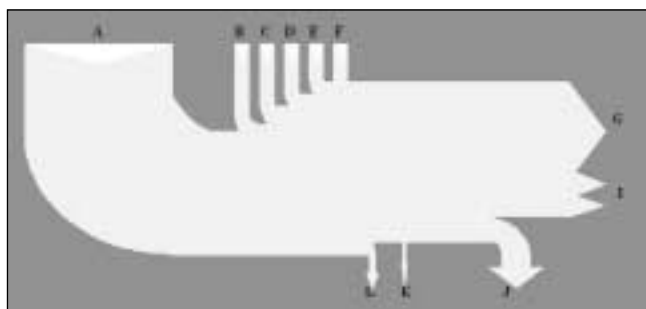


Fig. 2 – Diagramma dei flussi energetici.

Fig. 2 – Diagram of the energy flows.

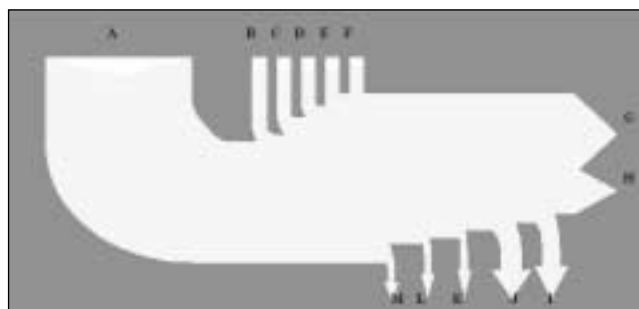


Fig. 3 – Diagramma dei flussi exergetici.

Fig. 3 – Diagram of the exergetic flows.

A) energia elettrica	$E_{el}$	100 %	F) acciaio liquido	$H_{acc}$	71.25 %
B) $\Delta H_{formazione}$	$SiO_2$	6.62 %		$H_{latente}$	13.74 %
C) $\Delta H_{formazione}$	$CO$	3.05 %	G) scoria	$H_{scoria}$	0.31 %
				$H_{calce}$	7.22 %
D) $\Delta H_{formazione}$	$MgO$	0.17 %	H) calore ceduto ai refrattari	$H_{refr}$	4.04 %
	$Al_2O_3$	0.44 %	I) calore ceduto all'acqua	$H_{H_2O}$	3.78 %
	$MnO$	0.47 %	J) calore ceduto ai fumi	$H_{fumi}$	12.69 %
	$Cr_2O_3$	0.10 %	K) calore ceduto agli elettrodi	$H_{elet}$	0.04 %
E) $\Delta H_{formazione}$	$FeO$	2.6 %			

$$\eta' = \frac{\text{energia acciaio}}{\text{energia entrante}} = \frac{F}{A + B + C + D + E} = 0.74$$

$$\eta'' = \frac{\text{energia acciaio} + \text{energia fumi} + \text{energia acqua}}{\text{energia entrante}} = \frac{F + J + I}{A + B + C + D + E} = 0.89$$

Tabella 2 – Flusso percentuale di energia nel forno elettrico ad arco con consumo di energia elettrica pari a 52 MJ/kg e insufflazione specifica di ossigeno pari a 0.010417 m<sup>3</sup>/s.

Table 2 – Percentage flow of the energy within a EAF with a specific electrical consumption of 52 MJ/kg and a specific oxygen flow rate of 0.010417 m<sup>3</sup>/s.

A) energia elettrica	$E_{el}$	100 %	F) acciaio liquido	$H_{acc}$	66.98 %
B) $\Delta H_{formazione}$	$SiO_2$	7.27%		$H_{latente}$	13.74 %
C) $\Delta H_{formazione}$	$CO$	3.16 %	G) scoria	$H_{scoria}$	0.51 %
				$H_{calce}$	7.22 %
D) $\Delta H_{formazione}$	$MgO$	0.17 %	H) calore ceduto ai refrattari	$H_{refr}$	6.81 %
	$Al_2O_3$	0.46 %	I) calore ceduto all'acqua	$H_{H_2O}$	3.78 %
	$MnO$	0.51 %	J) calore ceduto ai fumi	$H_{fumi}$	14.67 %
	$Cr_2O_3$	0,1 %	K) calore ceduto agli elettrodi	$H_{elet}$	0.04 %
E) $\Delta H_{formazione}$	$FeO$	2,83 %			

$$\eta' = \frac{\text{energia acciaio}}{\text{energia entrante}} = \frac{F}{A + B + C + D + E} = 0.7$$

$$\eta'' = \frac{\text{energia acciaio} + \text{energia fumi} + \text{energia acqua}}{\text{energia entrante}} = \frac{F + J + I}{A + B + C + D + E} = 0.86$$

Tabella 3 – Flusso percentuale di energia nel forno elettrico ad arco con consumo di energia elettrica pari a 50.7MJ/kg e insufflazione specifica di ossigeno pari a 0.011714 m<sup>3</sup>/s.

Table 3 – Percentage flow of the energy within a EAF with a specific electrical consumption of 50.7MJ/kg and a specific oxygen flow rate of 0.011714 m<sup>3</sup>/s.

A) energia elettrica	$E_{el}$	100 %	F) acciaio liquido	$H_{acc}$	66.19 %
B) $\Delta H_{formazione}$	$SiO_2$	9.28 %		$H_{latente}$	13.74 %
C) $\Delta H_{formazione}$	$CO$	3.98 %	G) scoria	$H_{scoria}$	0.72 %
				$H_{calce}$	7.22 %
D) $\Delta H_{formazione}$	$MgO$	0.17%	H) calore ceduto ai refrattari	$H_{refr}$	8.72 %
	$Al_2O_3$	0.54 %	I) calore ceduto all'acqua	$H_{H_2O}$	3.78 %
	$MnO$	0.73 %	J) calore ceduto ai fumi	$H_{fumi}$	18.02 %
	$Cr_2O_3$	0.16 %	K) calore ceduto agli elettrodi	$H_{elet}$	1.32 %
E) $\Delta H_{formazione}$	$FeO$	4.69 %			

$$\eta' = \frac{\text{energia acciaio}}{\text{energia entrante}} = \frac{F}{A + B + C + D + E} = 0.66$$

$$\eta'' = \frac{\text{energia acciaio} + \text{energia fumi} + \text{energia acqua}}{\text{energia entrante}} = \frac{F + J + I}{A + B + C + D + E} = 0.85$$

Tabella 4 – Flusso percentuale di energia nel forno elettrico ad arco con consumo di energia elettrica pari a 49.4MJ/kg e insufflazione specifica di ossigeno pari a 0.013021 m<sup>3</sup>/s.

Table 4 – Percentage flow of the energy within a EAF with a specific electrical consumption of 49.4MJ/kg and a specific oxygen flow rate of 0.013021 m<sup>3</sup>/s.

A) exergia elettrica	$B_{el}$	100 %	F) acciaio liquido	$B_{acc}$	39.03 %
B) $\Delta B_{formazione}$	$SiO_2$	6.62 %		$B_{latente}$	11.32 %
C) $\Delta B_{formazione}$	$CO$	3.05 %	G) exergia distrutta	$B_{distrutta}$	47.52 %
			H) scoria	$B_{scoria}$	0.20 %
D) $\Delta B_{formazione}$	$MgO$	0.17 %		$B_{calce}$	4.79 %
	$Al_2O_3$	0.44 %	I) calore ceduto ai refrattari	$B_{refr}$	2.12 %
	$MnO$	0.47 %	J) calore ceduto all'acqua	$B_{H_2O}$	0.14 %
	$Cr_2O_3$	0.10 %	K) calore ceduto ai fumi	$B_{fumi}$	12.09 %
E) $\Delta B_{formazione}$	$FeO$	2.6 %	L) calore ceduto agli elettrodi	$B_{elet}$	0.39 %

$$\Theta' = \frac{\text{exergia acciaio}}{\text{exergia entrante}} = \frac{F}{A + B + C + D + E} = 0.44$$

$$\Theta'' = \frac{\text{exergia acciaio} + \text{exergia fumi} + \text{exergia acqua}}{\text{exergia entrante}} = \frac{F + K + J}{A + B + C + D + E} = 0.55$$

Tabella 5 – Flusso percentuale di exergia nel forno elettrico ad arco con consumo di energia elettrica pari a 52MJ/kg e insufflazione specifica di ossigeno pari a 0.010417 m<sup>3</sup>/s.

Table 5 – Percentage flow of the exergy within a EAF with a specific electrical consumption of 52MJ/kg and a specific oxygen flow rate of 0.010417m<sup>3</sup>/s.

A) exergia elettrica	$B_{el}$	100 %	F) acciaio liquido	$B_{acc}$	36.32 %
B) $\Delta B_{formazione}$	$SiO_2$	7.27%		$B_{latente}$	11.32 %
C) $\Delta B_{formazione}$	$CO$	3.16 %	G) exergia distrutta	$B_{distrutta}$	51.34 %
			H) scoria	$B_{scoria}$	0.35 %
D) $\Delta B_{formazione}$	$MgO$	0.17 %		$B_{calce}$	4.79 %
	$Al_2O_3$	0.46 %	I) calore ceduto ai refrattari	$B_{refr}$	3.09 %
	$MnO$	0.51 %	J) calore ceduto all'acqua	$B_{H_2O}$	0.41 %
	$Cr_2O_3$	0,1 %	K) calore ceduto ai fumi	$B_{fumi}$	13.98 %
E) $\Delta B_{formazione}$	$FeO$	2.83 %	L) calore ceduto agli elettrodi	$B_{elet}$	0,49 %

$$\Theta' = \frac{\text{exergia acciaio}}{\text{exergia entrante}} = \frac{F}{A + B + C + D + E} = 0,41$$

$$\Theta'' = \frac{\text{exergia acciaio} + \text{exergia fumi} + \text{exergia acqua}}{\text{exergia entrante}} = \frac{F + K + J}{A + B + C + D + E} = 0,54$$

Tabella 6 – Flusso percentuale di exergia nel forno elettrico ad arco con consumo di energia elettrica pari a 50.7MJ/kg e insufflazione specifica di ossigeno pari a 0.011714 m<sup>3</sup>/s.

Table 6 – Percentage flow of the exergy within a EAF with a specific electrical consumption of 50.7MJ/kg and a specific oxygen flow rate of 0.011714 m<sup>3</sup>/s.

A) exergia elettrica	$B_{el}$	100 %	F) acciaio liquido	$B_{acc}$	32.56 %
B) $\Delta B_{formazione}$	$SiO_2$	9.28 %		$B_{latente}$	11.32 %
C) $\Delta B_{formazione}$	$CO$	3.98 %	G) exergia distrutta	$B_{distrutta}$	53.11 %
			H) scoria	$B_{scoria}$	0.33 %
D) $\Delta B_{formazione}$	$MgO$	0.17%		$B_{calce}$	4.79 %
	$Al_2O_3$	0.54 %	I) calore ceduto ai refrattari	$B_{refr}$	4.38 %
	$MnO$	0.73 %	J) calore ceduto all'acqua	$B_{H_2O}$	0.35 %
	$Cr_2O_3$	0.16 %	K) calore ceduto ai fumi	$B_{fumi}$	17.52 %
E) $\Delta B_{formazione}$	$FeO$	4.69 %	L) calore ceduto agli elettrodi	$B_{elet}$	0.39 %

$$\Theta' = \frac{\text{exergia acciaio}}{\text{exergia entrante}} = \frac{F}{A + B + C + D + E} = 0.37$$

$$\Theta'' = \frac{\text{exergia acciaio} + \text{exergia fumi} + \text{exergia acqua}}{\text{exergia entrante}} = \frac{F + K + J}{A + B + C + D + E} = 0.52$$

Tabella 7 – Flusso percentuale di exergia nel forno elettrico ad arco con consumo di energia elettrica pari a 49.4MJ/kg e insufflazione specifica di ossigeno pari a 0.013021 m<sup>3</sup>/s.

Table 7 – Percentage flow of the exergy within a EAF with a specific electrical consumption of 49.4MJ/kg and a specific oxygen flow rate of 0.013021 m<sup>3</sup>/s.

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Dai risultati ottenuti si può notare che, apparentemente, l'utilizzo di quantità maggiori di ossigeno e quindi un maggiore sviluppo dell'entalpia connessa alle reazioni chimiche, sembra diminuire la resa energetica del forno elettrico ad arco. D'altra parte, nell'approccio integrato previsto dalle IPPC va tenuto conto della sorgente dell'energia elettrica, che, in particolare nel caso italiano, risulta essere in gran parte di tipo termoelettrico. Nelle centrali termoelettriche più efficienti (che prevedono ciclo combinato [turbogas-ciclo Rankine] e teleriscaldamento) il rendimento stenta ad arrivare al 56%. Per cui, nell'utilizzo di energia elettrica all'interno dei forni elettrici va tenuto conto del fatto che a livello integrato si sta degradando a calore una forma di ener-

gia con elevato valore exergetico, generata precedentemente da processi di combustione con elevate dissipazioni di energia e di exergia. Per cui, il calo del rendimento energetico funzionale da 0.74 a 0.66 è ampiamente compensato dall'inferiore utilizzo dell'energia elettrica erogata, che comporta una superiore diminuzione dell'impatto ambientale generato a monte dalla centrale termoelettrica.

La spinta all'utilizzo delle energie sviluppate da processi di combustione promossi dall'ossigeno insufflato nel bagno trova però dei limiti che devono essere attentamente valutati:

- da un punto di vista strettamente economico l'utilizzo di maggiori quantità di energia chimica tende a diminuire la produttività d'impianto, in quanto tali mezzi non sono in grado di erogare potenze (energie per unità di tempo) paragonabili a quelle sviluppate da un arco elettrico;

• ma anche dal punto di vista ambientale è necessario rilevare che:

- l'incremento dello sviluppo del volume dei fumi generati porta necessariamente ad una diminuzione della resa metallica, ossia il rapporto tra materiale metallico caricato e materiale spillato, con una distruzione (qui peraltro non computata) del contenuto exergetico di prodotti metallici che nella loro storia sono già andati soggetti a onerose operazioni di riduzione chimica ad opera di tecnologie chimiche o elettrochimiche. Tali metalli attraverso il processo di ossidazione tornano allo stato di equilibrio con lo stato di riferimento dell'atmosfera circostante (perdendo "il valore aggiunto" che i processi di riduzione precedenti avevano loro conferito attraverso il consumo di risorse naturali, es. consumo di coke ed alliganti nei processi di riduzione all'altoforno)<sup>1</sup>;
- se il problema viene considerato a livello integrato e stanti le considerazioni al punto precedente circa la generazione di energia elettrica, l'utilizzo di una quantità maggiore di ossigeno non realizza un incremento nello sviluppo di gas serra (CO<sub>2</sub>);
- a seconda dei parametri di processo si può stabilire che le condizioni ottimali di sfruttamento delle energie chimiche si situano in un intervallo piuttosto ampio, che si può considerare stimare nel 25%-35% dell'energia elettrica specifica equivalente necessaria per fondere la carica, compresa tra 555kWh/ton e 550kWh/ton. Nell'intervallo suddetto va individuata la corretta frazione di energia chimica in base alla tipologia del rottame caricato, alle tipologie di impianto e agli eventuali sistemi di recupero del calore di cui è dotato il forno;
- il bilancio exergetico mostra che il rendimento exergetico razionale non cambia in modo significativo al variare delle condizioni di ripartizione dell'energia elettrica e dell'energia chimica, che viene modulata attraverso variazioni della portata specifica di ossigeno. D'altro canto, il rendimento funzionale cambia in modo significativo, il che segnala una nuova distribuzione dell'exergia fra gli elementi coinvolti nel processo fusorio;
- si rileva che al crescere della portata specifica dell'ossigeno insufflato si amplia la frazione exergetica conferita ai fumi, all'acqua e ai refrattari rispetto alla frazione assorbita dall'acciaio liquido;
- l'impatto ambientale di una tale situazione può essere diminuito cercando di recuperare parte dell'exergia conferita ai fumi, all'acqua e ai refrattari. Il recupero dell'exergia (che si ricorda è la frazione di energia che può essere convertita in lavoro utile) si può realizzare con la predisposizione di sistemi di preriscaldamento del rottame, in grado di sfruttare, in tutto o in parte, il calore dei fumi, oppure con l'applicazione di sistemi di raffreddamento ad acqua (in grado di vaporizzare il fluido refrigerante), al fine di recuperare parte dell'exergia dei fumi, dell'acqua e dei refrattari. Tale exergia potrebbe essere utilizzata per generare nuova energia elettrica o per alimentare gli impianti ausiliari. L'utilizzo di scambiatori di calore potrebbe invece consentire di recuperare, ai fini di riscaldamento, una parte della frazione di calore che non potrebbe essere convertita in lavoro utile.

<sup>1</sup> Questo aspetto è particolarmente critico per acciaierie che partono da rottami pregiati con elevato contenuto di elementi alliganti (es: Cr, Ni ecc.) e che per tale ragione devono ponderare con attenzione l'adozione di sistemi ossi-combustibile, onde non incrementare il rendimento energetico con un'eccessiva dispersione di risorse naturali che potrebbe essere all'origine di impatti ambientali di entità tale da compensare i risparmi energetici.

## CONCLUSIONI

La valutazione di impatto ambientale dal punto di vista dell'efficienza energetica coinvolge diversi aspetti del sistema metallurgico. La complessità del problema richiede l'adozione di un criterio che permetta di rendere i dati dei diversi aspetti tra loro quantitativamente confrontabili. Dal punto di vista ambientale il criterio exergetico è quello che attualmente appare maggiormente affidabile e comprensivo, in forza del suo significato fisico e della sua versatilità.

Il modello ed il criterio che sono stati adottati non consentono di pervenire alla definizione di parametri di processo generali, che possono essere adottati o imposti per garantire l'efficienza energetica dell'impianto. I parametri di processo, ed in particolare la scelta della ripartizione fra energia elettrica ed energia chimica, vanno valutati dai singoli gestori dell'impianto in funzione del tipo di rottame caricato, della dimensione del forno, dell'efficienza dei sistemi ossi-combustibile, dei sistemi di recupero e di sfruttamento dell'exergia conferita ai fumi all'acqua e ai refrattari.

Quello che invece può avere validità generale è il tipo di approccio strutturato che consente:

- di descrivere sinteticamente la prestazione ambientale del sistema;
- di pervenire ad un calcolo delle prestazioni di processo che possa servire come base di discussione con le autorità competenti, senza dover ricorrere a valori limite generali che possono anche deteriorare l'efficienza energetica-exergetica dell'impianto, anziché portare ai desiderati benefici sul piano ambientale;
- di permettere di porre in evidenza quegli aspetti che non costituiscono solo un vincolo, ma un vantaggio in termini economici per l'azienda stessa;
- di guidare alla calibrazione dei parametri di processo che meglio si adattano ad un particolare tipo di impianto, con il conseguente vantaggio di giungere ad una massimizzazione della produttività nel rispetto dei vincoli di impatto ambientale. In questo modo è auspicabile che si possa superare l'imposizione di vincoli rigidi, che in alcune circostanze sono addirittura in grado di provocare inefficienze di impatto ambientale di entità maggiore rispetto agli incrementi di efficienza che ci si prefiggerebbe di conseguire;
- la valutazione critica della prestazione di impatto ambientale integrato qui presentata non può essere estesa tout-court a forni dotati di sistemi di iniezione multi-punto che in funzione del loro posizionamento geometrico e delle modalità di iniezione (velocità, dimensione degli ugelli, inclinazione sul bagno) possono modificare significativamente e spesso positivamente le prestazioni integrate di impatto ambientale.

## APPENDICE: ENERGIA ED EXERGIA

### I Concetti di Exergia e Anergia

La legge sulla conservazione dell'energia (Equazione 1) è uno dei pilastri della fisica classica. E' noto, infatti, come un generico oggetto possa acquistare o cedere indistintamente all'ambiente energia (cinetica, chimica, potenziale ed elastica), a condizione che il bilancio complessivo non violi la suddetta legge.

$$U = Q - W \quad (1)$$

La legge di conservazione, espressa da un bilancio di energia, è basata sul primo principio della termodinamica, il quale però non quantifica l'"utilità" delle diverse forme di energia coinvolte nel bilancio, né dà alcuna informazione sulla degradazione dell'energia che può avvenire in un processo. In particolar modo si è portati a pensare che il calore possa essere convertito indiscriminatamente in lavoro. In

realtà, dal secondo principio della termodinamica, si sa che non può esserci equivalenza tra la quantità di lavoro ottenibile da un processo e la quantità di calore utilizzata per ottenerlo; le limitazioni a questa conversione di calore in lavoro dipendono, infatti, dalla temperatura a cui il calore è disponibile (quella ambiente  $T_a$ ) e dalle irreversibilità coinvolte nel trasferimento di calore (produzione d'entropia del processo  $S_p$ ), come appare evidente dalla formulazione del rendimento di secondo principio  $\eta_2$  per un processo termodinamico:

$$\eta_2 = \frac{W_{max} - T_a S_p}{W_{max}}$$

Rapporto tra il lavoro il lavoro massimo ottenibile (numeratore) e quello effettivamente estratto dal deposito di calore del sistema che si trova a temperatura maggiore.

Il rendimento di secondo principio, nel caso di un processo perfettamente reversibile risulta unitario, e nel caso reale il suo scostamento dall'unità è una misura della irreversibilità del processo; è quindi più idoneo del rendimento di primo principio  $\eta_1$  ad evidenziare la "bontà termodinamica" del processo.

$$\eta_1 = \frac{W}{Q_h} = 1 - \frac{T_a}{T_h} - \frac{T_a S_p}{Q_h}$$

Rapporto tra il lavoro ottenuto e il calore prelevato dal deposito di calore a temperatura maggiore.

Oltre a queste limitazioni, che affliggono in particolare il tipo di processo utilizzato, sussistono altre limitazioni che riguardano la "qualità" delle varie forme di energia coinvolte: la qualità si manifesta nella loro attitudine ad essere trasformate in lavoro e ad essere convertite in altre forme di energia. E' dunque possibile fare una classificazione delle varie forme di energia (fig. 4), distinguendole in:

ANERGIA = parte di energia non convertibile

EXERGIA = parte di energia convertibile

Non si deve essere portati a credere, però, che l'anergia non serva a nessuno scopo pratico: si pensi per esempio al riscaldamento domestico. Per quanto riguarda l'exergia, invece, il suo concetto è stato così definito da Szargut:

*"Exergia è la quantità di lavoro ottenibile quando una parte di materia è portata ad uno stato d'equilibrio termodinamico con i comuni elementi della natura di cui è circondata, attraverso processi reversibili che coinvolgono interazioni solo con i sopraccitati elementi della natura"* [1]

Questa definizione, accompagnata dal rendimento di secondo principio della termodinamica, porta a concludere che l'exergia è anche il massimo lavoro estraibile da un processo condotto in modo reversibile e portato allo stato di equilibrio termodinamico con l'ambiente circostante (livello zero). Ovvero l'exergia, il lavoro potenziale massimo che può essere ottenuto in modo reversibile fino allo "stato morto" (stato in cui il sistema raggiunge i parametri termodinamici dell'ambiente circostante a temperatura  $T_a$  e pressione  $p_a$ ), è tanto maggiore sia quanto maggiore è la temperatura del sistema (rispetto  $T_a$ ), sia quanto più elevata è la sua pressione (rispetto  $p_a$ ), e cioè in definitiva quanto più il sistema è termodinamicamente mantenuto lontano dalle condizioni di equilibrio con l'ambiente di riferimento.

D'altra parte, sempre dal rendimento del secondo principio, si ricava che il massimo lavoro ottenibile è influenzato dalla temperatura ambiente, ed è irraggiungibile a causa delle irreversibilità che sempre affliggono i processi termodinamici.

Il lavoro così perduto, se si considera come temperatura minore coinvolta nel processo quella ambiente, è pari alla variazione di exergia (anergia), e in prima approssimazione al prodotto della somma degli incrementi entropici di tutte la

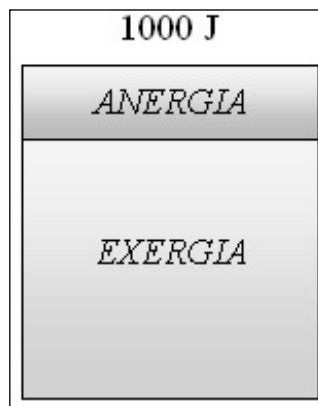


Fig. 4 – Esempio di ripartizione dell'energia in anergia ed energia.

Fig. 4 – Example of partition of the energy in anergy and energy.

parti del sistema ( $\Sigma\Delta S$ ) e della temperatura ambiente ( $T_a$  in gradi Kelvin):

$$W_{lost} = \Delta B = T_a \cdot \Sigma\Delta S \quad (2)$$

L'exergia non è una funzione di stato e, come si vedrà in seguito, non è soggetta ad un principio di conservazione, quindi ogni fenomeno irreversibile ne causa una perdita (il  $\Delta B$  dell'espressione precedente) che porta ad una riduzione degli effetti utili di un processo o ad un incremento del consumo di energia.

Da com'è stata caratterizzata questa grandezza, si può comprendere l'utilità di un'analisi exergetica. A differenza di un'analisi puramente energetica, infatti, questo tipo d'analisi supera le limitazioni del primo principio, che considera identiche tutte le forme di energia, e si basa contemporaneamente sia sul primo che sul secondo principio, e sui loro corollari:

**1° principio della termodinamica:** se un sistema compie una trasformazione tra due stati, scambiando calore e lavoro con l'ambiente,  $Q$  e  $W$  dipendono dalla particolare trasformazione, mentre  $(Q-W)$  ne è indipendente ed uguale alla variazione di energia interna.

**Corollario al 1° principio:** in una qualsiasi trasformazione (reversibile o irreversibile) di un sistema termodinamico, la quantità di calore scambiata con l'esterno dal sistema è pari alla somma della variazione di energia interna del sistema e del lavoro da esso compiuto (Equazione 1).

**2° principio della termodinamica:** è impossibile realizzare una macchina ciclica che funzioni con una sola sorgente di calore e sia capace di produrre lavoro (nella versione di Lord Kelvin).

**Corollario al 2° principio:** non esistono limiti alla trasformazione di energia meccanica in calore; al contrario, una quantità di calore prelevata da una sorgente non può essere trasformata completamente in lavoro senza produrre altre modifiche sui sistemi circostanti.

L'analisi exergetica consente dunque di analizzare un processo termodinamico da un duplice punto di vista: in base al primo principio, imponendo la conservazione quantitativa dell'energia, e in base al secondo principio studiando la qualità dell'energia, ovvero rivelando se il processo è afflitto da irreversibilità e quantificandole come perdite exergetiche. La vicinanza del processo reale al processo ideale reversibile è quantificabile attraverso la definizione di un rendimento exergetico funzionale genericamente definito come:

$$\Theta = \frac{\text{risultato utile}}{\text{risultato utile conseguibile con un processo reversibile}} \quad (3)$$

Un'analisi di questo tipo può essere utilizzata per indicare chiaramente le fonti di perdita di exergia e aiutare a migliorare il processo termodinamico, intervenendo solo là dove serve. In un quadro più ampio, applicazioni economiche del-

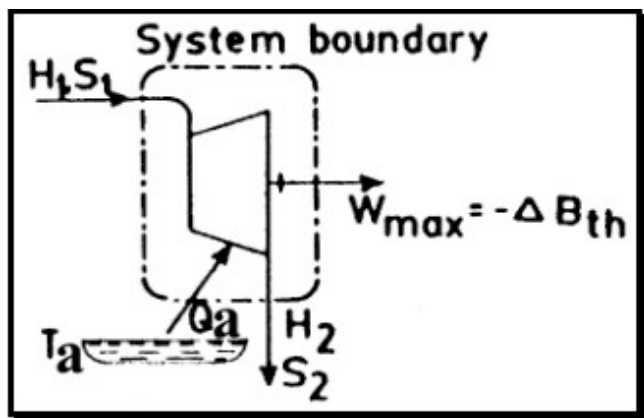


Fig. 5 – Modello per il calcolo della variazione di exergia termica.

Fig. 5 – Model for the computation of the variation of the thermal exergy.

L'analisi exergetica sono state proposte per la valutazione approssimata degli effetti dei parametri termodinamici sul valore economico della fonte di exergia.

**L'Exergia nei suoi Formalismi**

Escludendo effetti nucleari, magnetici, elettrici e d'interfaccia, l'exergia B può essere suddivisa in più componenti: exergia cinetica B<sub>k</sub>, exergia potenziale B<sub>p</sub>, exergia fisica B<sub>ph</sub> ed exergia chimica B<sub>ch</sub>:

$$B = B_k + B_p + B_{ph} + B_{ch} \quad (4)$$

L'exergie cinetica e potenziale sono uguali alle energie cinetica e potenziale, se vengono considerate relativamente alla superficie terrestre. L'exergia fisica è il lavoro ottenibile portando una sostanza, attraverso processi reversibili, da uno stato con temperatura T e pressione p iniziali ad uno stato con temperatura T<sub>a</sub> e pressione p<sub>a</sub> dell'ambiente. L'exergia chimica è il lavoro ottenibile portando una sostanza con parametri T<sub>a</sub> e p<sub>a</sub> allo stato d'equilibrio termodinamico con un determinato componente dell'ambiente. Per convenzione, la somma dell'exergia fisica e chimica viene chiamata exergia termica B<sub>th</sub>:

$$B_{th} = B_{ph} + B_{ch} \quad (5)$$

**Variazione di Exergia Termica tra due Stati di un Processo Reversibile**

La variazione di exergia termica può essere calcolata con l'ausilio del seguente modello (Figura 5).

Un flusso di energia con entalpia H<sub>1</sub> ed entropia S<sub>1</sub> entra in una macchina reversibile. Ipotizzando che le velocità del flusso, entrante ed uscente, e il dislivello in altezza siano trascurabili, dopo una variazione di energia chimica o fisica, il flusso uscente ha entalpia H<sub>2</sub> ed entropia S<sub>2</sub>. La macchina può scambiare calore Q<sub>a</sub> reversibilmente con l'ambiente circostante.

Il massimo lavoro che può essere estratto dalla macchina è, allora, dato dalla variazione di exergia tra il flusso entrante e il flusso uscente:

$$B_{th1} - B_{th2} = -\Delta B_{th} = H_1 - H_2 + Q_a = W_{max} \quad (6)$$

La condizione di reversibilità porta ad avere variazione d'entropia nulla per l'intero sistema

$$S_2 - S_1 - Q_a/T_a = 0 \quad (7)$$

Mettendo a sistema le due equazioni è possibile allora calcolare l'exergia fisica. Se come serbatoio di calore si considera l'ambiente, risulta:

$$B_{ph} = H_1 - H_a - T_a(S_1 - S_a) = W_{max} = H_{ph} - T_a S_{ph} \quad (8)$$

**Legge di Gouy-Stodola:**

**Perdita di Exergia in un Processo Irreversibile**

Con il modello della figura seguente è possibile calcolare la perdita di exergia (Figura 6).

Il processo è irreversibile ed è alimentato da una fonte di exergia con entalpia H<sub>1</sub> ed entropia S<sub>1</sub>; i corrispondenti parametri all'uscita sono H<sub>2</sub> e S<sub>2</sub>. Il processo è anche alimentato dal calore Q<sub>1</sub> prelevato da una fonte a temperatura T<sub>1</sub>, mentre Q<sub>a</sub> è il calore ceduto all'ambiente. Il processo può restituire o lavoro meccanico W<sub>u</sub> o un prodotto con parametri H<sub>u</sub> e S<sub>u</sub>.

Gli effetti dell'irreversibilità possono essere trovati comparando il processo in esame con un processo reversibile operante con gli stessi parametri. Il processo reversibile restituirà una maggior quantità di prodotto, espressa dai parametri H<sub>ur</sub> e S<sub>ur</sub>, e una minor quantità di calore perduto Q<sub>ar</sub>.

$$I_{rr} \quad H_u = H_1 - H_2 + Q_1 - Q \quad (9)$$

$$R_{ev} \quad H_{ur} = H_1 - H_2 + Q_1 - Q_{ar} \quad (10)$$

Dove H<sub>u</sub> < H<sub>ur</sub> e Q<sub>a</sub> > Q<sub>ar</sub>.

Dalle due equazioni segue che

$$H_{ur} - H_u = Q_a - Q_{ar} \quad (11)$$

Gli incrementi d'entropia nel processo irreversibile (I<sub>rr</sub>) e reversibile (R<sub>ev</sub>) sono dati da

$$I_{rr} \quad \Sigma \Delta S = -Q_1/T_1 + S_2 - S_1 + Q_a/T_a + S_u \quad (12)$$

$$R_{ev} \quad \Sigma \Delta S = -Q_1/T_1 + S_2 - S_1 + Q_{ar}/T_a + S_{ur} = 0 \quad (13)$$

Dalle due equazioni segue che

$$Q_a - Q_{ar} = T_a(\Sigma \Delta S + S_{ur} - S_u) \quad (14)$$

Componendo le due relazioni (11) e (14), segue che:

$$H_{ur} - H_u - T_a(S_{ur} - S_u) = T_a \Sigma \Delta S \quad (15)$$

cioè:

$$(H_{ur} - T_a S_{ur}) - (H_u - T_a S_u) = T_a \Sigma \Delta S \quad (16)$$

Il termine di sinistra dell'equazione rappresenta la differenza di exergia termica utile tra il processo reversibile e il processo irreversibile considerato. Esso esprime perciò la perdita di exergia δB dovuta alle irreversibilità del processo considerato:

$$\delta B = T_a \Sigma \Delta S \quad (17)$$

Questa equazione rappresenta la legge della perdita di exergia o legge di Gouy-Stodola, e permette, inoltre, la ripartizione delle perdite di exergia tra le varie parti del processo. Il termine "perdita di exergia" non deve però essere confuso con il "lavoro perso a causa delle irreversibilità", poiché quest'ultimo può avere varie definizioni.

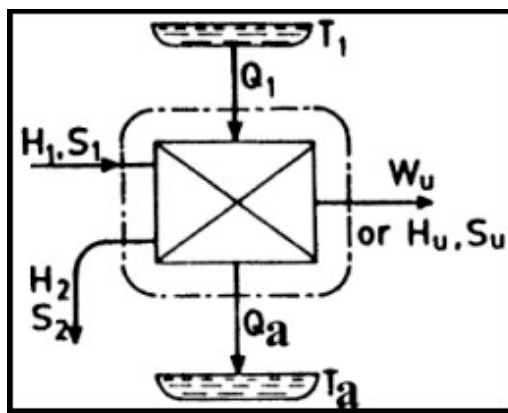


Fig. 6 – Modello per il calcolo della perdita di exergia.

Fig. 6 – Model for the computation of the exergy loss.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Szargut D. R. Morris F. R. Steward, Exergy Analysis Of Thermal, Chemical, And Metallurgical Processes, Cap. 1/2/3/7 ,Hemisphere Publishing Corporation, 1998.
- [2] P. W. Atkins, Physical Chemistry, Oxford University Press, Fifth Edition, 1994
- [3] F. Oeters, Metallurgy Of Steelmaking, Verlag Stahleisen mbH Düsseldorf, Cap. 8, 1994.
- [4] G. Bisio, Heat Transfer, Energy Saving And Pollution Control In UHP Electric-Arc Furnaces, Energy, Vol. 25, Issue 11, pp. 1047-1066, 2000.
- [5] S. Mochida T. Hasegawa, Heat Transfer Characteristics Of An Industrial Furnace Using High Temperature Air Combustion, Proceedings Of 2000 International Joint Power Generation Conference.
- [6] S. Chirattananon Z. Gao, A Model For The Performance Evaluation Of The Operation Of Electric Arc Furnace, Energy Convers. Mgmt Vol. 37, No. 2, pp. 161-166, 1996.
- [7] Y. K. Wu M. Lacroix, Numerical Simulation Of The Melting Of Scrap Metal In A Circular Furnace, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 22, No. 4, pp. 517-525, 1995.
- [8] T. J. Kotas, The Exergy Method Of Thermal Plant Analysis, Butterworths, 1985.

$\Delta B$	perdita di exergia (J)	$B_{scoria}$	exergia totale della scoria, compresa la calce (J)
$\Delta H_{reaz}$	entalpia di reazione (J)	$B_{th}$	exergia termica (J)
$B$	exergia (J)	$B_w$	exergia del lavoro meccanico (J)
$B_{acc}$	exergia totale dell'acciaio (J)	$H$	entalpia (J)
$B_{calce}$	exergia totale della calce (J)	$H_x$	entalpia legata all'elemento x considerato nella simulazione (J)
$B_{ch}$	exergia chimica (J)	$T$	temperatura (K)
$B_{distrutta}$	exergia distrutta (J)	$\delta B$	perdita di exergia per irreversibilità (J)
$B_{el}$	exergia dell'arco elettrico (J)	$\eta'$	rendimento energetico
$B_{elet}$	exergia totale degli elettrodi (J)	$\eta''$	rendimento energetico
$B_{fumi}$	exergia totale dei fumi (J)	$\eta_1$	rendimento di primo principio
$B_{H2O}$	exergia totale dell'acqua di raffreddamento (J)	$\eta_2$	rendimento di secondo principio
$B_k$	exergia cinetica (J)	$\Theta$	rendimento exergetico funzionale
$B_{latente}$	exergia del calore latente del cambiamento di fase solido-liquido (J)	$\Theta'$	rendimento exergetico
$B_p$	exergia potenziale (J)	$\Theta''$	rendimento exergetico
$B_{ph}$	exergia fisica (J)	$\mu\Delta S$	somma degli incrementi entropici di tutte la parti del sistema (J/K)
$B_{refr}$	exergia totale dei refrattari (J)		

A B S T R A C T

**VALUTAZIONE CRITICA DELL'IMPIEGO  
DI ENERGIA ELETTRICA E CHIMICA IN EAF  
PER LA DIMINUZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE**

**KEY WORDS: environment, steelmaking, EAF,  
melting, energy and exergy**

The present study is about the application of a diachronic simulation model which is able to simulate a melting process (Figure 1) within an electric arc furnace of 40 ton equipped by a door oxygen lance. The model has been tested on different conditions and the energy and exergy balance have been performed (Table 1, Table 2, Table 3, Table 4, Table 5, Table 6, Table 7). The performed simulations allow to stress a critical evaluation about the balance of the exploitation of the chemical and electrical energies as function of the used scrap type. In the case of the use of expensive and high qua-

lity scrap the excessive oxidation of the charged metal can produce a serious drawback from the economical and from the environmental point of view. On the other hand, the increase in the CO<sub>2</sub> due to a possible increase in the exploitation of the chemical energies has to be evaluated from a global perspective in which the savings of the emissions of the thermoelectric plants have been taken into account, too. This is a first example of a critical application of the IPCC indications for an integrated evaluation of the pollution emissions.

The obtained results cannot be extended to the situations of the furnace equipped by multi-point supersonic injection system which can produce a very different oxidation trend within the bath, often allowing a better metallurgical performance featured by greater savings of the iron and of other alloying elements (i.e. Cr, Mn) and a related better oxidation of the most thermogen element like Si.